

Научная статья
УДК 631.365
doi: 10.28983/asj.y2023i7pp143-146

Тепломассоперенос при импульсной сушке зерна

Михаил Геннадьевич Загоруйко¹, Сергей Анатольевич Павлов¹, Игорь Андреевич Башмаков¹, Александр Иванович Шематурин²

¹ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия.

²ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», г. Саратов, Россия.

e-mail: agroingener.ep@yandex.ru

Аннотация. Технология постоянного воздействия на зерно агентом сушки является неоптимальной из-за того, что зерно перегревается быстрее чем происходит испарение влаги. Приходится понижать температуру агента сушки для снижения риска ухудшения качества зерна. Из-за этого снижается производительность зерносушилок с постоянным теплоподводом. Более перспективной является технология сушки с переменным теплоподводом. Импульсный режим является одним из разновидностей переменного режима. Данный режим сушки позволяет при сохранении паспортной производительности сушилок снизить удельные затраты тепла. Целью статьи является расчет длительности импульса, паузы и температуры агента сушки. Длительность нагрева зависит от коэффициента теплоотдачи, физико-механических свойств материала и логарифма разности температур агента сушки и материала. Длительность отлежки зависит от физико-механических свойств материала, логарифма разности отношения его влажности и коэффициента диффузии. В статье приведены характерные особенности тепломассопереноса и основные параметры процесса.

Ключевые слова: сушка; зерно; тепломассоперенос; импульсный режим; агент сушки.

Для цитирования: Загоруйко М. Г., Павлов С. А., Башмаков И. А., Шематурин А. И. Тепломассоперенос при импульсной сушке зерна // Аграрный научный журнал. 2023. № 7. С. 143–146. [http: 10.28983/asj.y2023i7pp143-146](http://10.28983/asj.y2023i7pp143-146).

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Heat and mass transfer in impulse grain drying

Mikhail G. Zagoruiko¹, Sergei A. Pavlov¹, Igor A. Bashmakov¹, Alexander I. Shematurin²

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia.

²Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia. e-mail: agroingener.ep@yandex.ru

Abstract. The technology of constant exposure to the grain with a drying agent is not optimal due to the fact that the grain overheats faster than moisture evaporates. It is necessary to lower the temperature of the drying agent to reduce the risk of deterioration in grain quality. Because of this, the performance of grain dryers with a constant heat supply is reduced. More promising is the drying technology with variable heat supply. The pulse mode is one of the varieties of the variable mode. This drying mode allows, while maintaining the passport performance of the dryers, to reduce the specific heat consumption. The purpose of the article is to calculate the pulse duration, pause and temperature of the drying agent. The duration of heating depends on the heat transfer coefficient, the physical and mechanical properties of the material and the logarithm of the temperature difference between the drying agent and the material. The duration of the deposit depends on the physical and mechanical properties of the material, the logarithm of the difference between the ratio of its moisture content and the diffusion coefficient. The article presents the characteristic features of heat and mass transfer and the main parameters of the process.

Keywords: drying; corn; heat and mass transfer; pulse mode; drying agent.

For citation: Zagoruiko M. G., Pavlov S. A., Bashmakov I. A., Shematurin A. I. Heat and mass transfer in impulse grain drying. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = The Agrarian Scientific Journal. 2023;(7):143–146. (In Russ.). [http: 10.28983/asj.y2023i7pp143-146](http://10.28983/asj.y2023i7pp143-146).





Введение. Хозяйства, возделывающие товарное зерно, часто приобретают современные зерносушилки, в том числе зарубежных фирм, которые работают по инновационным технологиям, в частности с переменным теплоподводом: импульсным, осциллирующим, реверсивным и т.д. Эти режимы, в частности предусматривают наравне с другими технологическими и конструктивными новшествами подачу агента сушки с меняющейся во времени температурой [1].

Технология постоянного воздействия на зерно агентом сушки является неоптимальной из-за того, что зерно перегревается быстрее чем происходит испарение влаги. Приходится понижать температуру агента сушки для снижения риска ухудшения качества зерна. Более перспективной является технология сушки с переменным теплоподводом. Согласно данной технологии, на зерно попеременно воздействуют подогретым и неподогретым агентом сушки, что позволяет интенсифицировать процесс и повысить температуру подогретого агента сушки [2, 3].

Известна технология осциллирующей сушки зерна, при которой его загружают, перемещают сверху – вниз, подвергают поочередному воздействию подогретым и неподогретым агентом сушки путем отключения топki, высушивают и разгружают [4].

Эта технология более эффективна по сравнению с сушкой при постоянном теплоподводе, однако даже кратковременное воздействие высокотемпературным подогретым агентом сушки не исключает возможность ухудшения качества зерна. Этот способ не может быть использован для сушилок при работе на жидком топливе, по технике безопасности из-за необходимости продувки топki после ее отключения. Более безопасным является импульсный режим [5].

Суть импульсного режима сушки заключается в том, что на зерно периодически воздействуют агентом сушки, а за время отлежки влага из ядра зерновки перемещается в оболочку с последующим испарением при вентилировании нагретым воздухом. Так как оболочка имеет капиллярно-пористую структуру в отличие от ядра, которое имеет капиллярно-пористую коллоидную структуру, то испаряется как со свободной поверхности воды с понижением температуры. Температуру зерна можно будет повысить на ту же величину, на которую охладилось. Таким образом, реализуется импульсный режим: импульс – пауза. В течение всего процесса поддерживается средняя температура зерна, например, равная предельно-допустимой $\theta_{\text{нд}}$ [6].

Цель работы – расчет длительности импульса, паузы и температуры агента сушки.

Методика исследований. Для достижения поставленной цели составим баланс переноса влаги между ядром и оболочкой.

Количество испаренной влаги за цикл из оболочки можно определить из

$$\Delta U_i = (U_n - U_p) \frac{M_{об}}{M_{зер}} \approx \frac{3 \delta (U_n - U_p)}{2 R n}, \quad (1)$$

где U_n, U_p – влагосодержание зерновки начальное и равновесное, кг вл./кг сух. мат.; $M_{об}, M_{зер}$ – масса оболочки и зерновки, кг; $M_{об} = \frac{3}{4} \pi [R^3 - (R - \delta)^3] \rho$; $M_{зер} = \frac{3}{4} \pi R^3 \rho$; δ – толщина оболочки, м; R – радиус зерновки, м; ρ – плотность зерновки, кг/м³; n – число циклов (частота циклов задается предварительно, в ходе расчета уточняется).

Вопрос определения времени нагрева термически тонких тел сводится к решению уравнению баланса теплоты, подводимой к поверхности нагреваемого тела (оболочки) и изменения энтальпии этого тела за тот же промежуток времени [7]:

$$\alpha(t_1 - \theta)F d\tau = Mc d\theta, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·°C; t_1 – температура агента сушки, °C; θ – температура нагрева зерна, °C; F – поверхность теплообмена, м²; τ – длительность процесса, ч.; M – вырабатываемое количество тепла организмом, Дж; c – теплоемкость, Дж/кг °C.

В соответствии с (2) длительность нагрева зерна τ_n записывают в виде:

$$\tau_n = \frac{c}{\alpha f \eta} \ln \frac{t_1 - \theta_1}{t_1 - \theta_2}, \quad (3)$$

где f – удельная поверхность зерна, м²/кг; η – доля теплоты, пошедшая на испарение влаги; t_1 – допустимая температура подогретого агента сушки; θ_1, θ_2 – минимальная и максимальная температура нагрева зерна, °С; $\theta_1 = \theta_{\text{нд}} - \Delta\theta$; $\theta_2 = \theta_{\text{нд}} + \Delta\theta$ ($\theta_{\text{нд}}$ – предельно-допустимая температура нагрева).

Согласно определению, теплоемкость c тела есть частное плотности потока на приращение температуры $\Delta\theta$ [3]:

$$c = \frac{Q}{\Delta\theta}, \quad (4)$$

где Q – количество теплоты, отдаваемое или полученное в окружающую среду, Дж.

Заменяя Q на $\Delta U r$, получим:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta U r}{c}, \quad (5)$$

где ΔU – влагосъем, кг вл./кг сух. мат.; r – удельная теплота испарения влаги, кДж/кг.

Выражение (3) для слоя запишем в виде:

$$\tau_{\text{им}} = \frac{c H}{\alpha f \eta h_i} \ln \frac{t_1 - \theta_1}{t_1 - \theta_2}, \quad (6)$$

где H, h_i – высота фактического и элементарного слоя (2–3 диаметра зерновки), м.

Из (6) можно определить допустимую температуру подогретого агента сушки:

$$t_1 = \frac{\theta_1 e^{\frac{\tau_{\text{им}}}{A}} - \theta_2}{e^{\frac{\tau_{\text{им}}}{A}} - 1}, \quad (7)$$

где $A = \frac{c H}{\alpha f \eta h_i}$.

Затем подставляем t_1 из (7) в (3) и путем приближений найдем величину $\tau_{\text{им}}$.

Длительность отлежки $\tau_{\text{от}}$ определим из выражения [8]:

$$\tau_{\text{от}} = \frac{2 \delta (R - \delta)}{3 a_m} \ln \frac{U_{\text{ср}} - U_p}{U_k - U_p}. \quad (8)$$

Результаты исследований. Рассчитаем $\tau_{\text{им}}$ и t_1 для сушки зерна рапса в зерносушилке. Высушивается рапс размером зерновки $R = 0,5$ мм и толщиной оболочки $\delta = 0,02$ мм с начальной влажностью $W_n = 22\%$, конечной – $W_k = 10\%$ и равновесной – $W_p = 7\%$; $c = 1,7$ кДж/кг·°С; $r = 2,5$ МДж/кг; $a_m = 1,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с.

Задаем количество циклов – 6 и после расчета получим $\Delta U_i = 0,002$ кг вл./кг сух. и $\Delta\theta = 3^\circ\text{С}$.

При $\theta_{\text{нд}} = 40^\circ\text{С}$; $Q_1 = 37^\circ\text{С}$; $Q_2 = 43^\circ\text{С}$; $\alpha = 30$ Вт/м²·°С; $f = 3$ м²/кг; $\eta = 0,6$; $t_1 = 55^\circ\text{С}$; $H = 0,1$ м; $h_i = 0,015$ м; $\tau_{\text{им}} = 4,6$ мин; $\tau_{\text{пауза}} = 18$ мин.

Заключение. При импульсном режиме сушки во время импульса влага перемещается в ядро, при отлежке – в оболочку, а при вентилировании подогретым воздухом – испаряется. Длительность нагрева зависит от коэффициента теплоотдачи, физико-механических свойств материала и логарифма разности температур агента сушки и материала. Длительность отлежки зависит от физико-механических свойств материала, логарифма разности отношения его влажности и коэффициента диффузии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байрамов Р.З., Саенко Ю.В. Анализ технических решений зерносушилок // Современные направления повышения эффективности использования транспортных систем и инженерных сооружений в АПК: Междунар. студ. науч.-практич. конф. Рязань, 2022. С. 153–157.

2. Голубкович А.В., Павлов С.А., Беленькая Л.И., Марин Р.А. Осциллирующая сушка семян и зерна в колонковой сушилке СЗТ-16 // Инновационные технологии и техника нового поколения –



основа модернизации сельского хозяйства: сб. докл. XI Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. М.: ВИМ, 2011. С. 392–399.

3. Голубкович А.В., Павлов С.А., Орехов А.П., Козлов В.П. Сушка семян рапса в карусельной сушилке при осциллирующем режиме // *Техника в сельском хозяйстве*. 2011. № 4. С. 25–28.

4. Использование осциллирующего режима контактной сушки сыпучих материалов / П.С. Агеев [и др.] // *Наука в центральной России Science in the central Russia*. 2022. Т. 60. № 6. С. 19–26.

5. Загоруйко М.Г., Марин Р.А. Тепломассоперенос в зерновке при переменных режимах // *Аграрный научный журнал*. 2021. № 7. С. 84–87.

6. Загоруйко М.Г., Бельшикина М.Е., Башмаков И.А. Обоснование математических моделей переменного теплоподвода при сушке зерна // *Аграрный научный журнал*. 2021. № 11. С. 87–92.

7. Пат. № 2539860 РФ Способ осциллирующей сушки зерна и устройство для его осуществления / Павлов С.А., Голубкович А.В., Лукин И.Д., Машковцев М.Ф. // *Бюл.* 2015. № 3.

8. Марин Р.А. Исследование переноса влаги в зерне при осциллирующей сушке // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. № 3. С. 26–32.

REFERENCES

1. Bayramov R.Z., Saenko Yu.V. Analysis of technical solutions for grain dryers. *Modern directions for improving the efficiency of using transport systems and engineering structures in the agro-industrial complex*. Ryazan, 2022: 153–157. (In Russ.).

2. Golubkovich A.V., Pavlov S.A., Belenkaya L.I., Marin R.A. Oscillating drying of seeds and grain in column dryer SZT-16. *Innovative technologies and new generation equipment are the basis for the modernization of agriculture*. Moscow, 2011: 392–399. (In Russ.).

3. Golubkovich A.V., Pavlov S.A., Orekhov A.P., Kozlov V.P. Drying of rape seeds in a rotary dryer in an oscillating mode. *Technique in agriculture*. 2011; 4: 25–28. (In Russ.).

4. Using the oscillating mode of contact drying of bulk materials / P.S. Ageev et al. *Science in Central Russia Science in the central Russia*. 2022; 60; 6: 19–26.

5. Zagoruiko M.G., Marin R.A. Heat and mass transfer in grains under variable regimes. *The agrarian scientific journal*. 2021; 7: 84–87. (In Russ.).

6. Zagoruiko M.G., Belyshkina M.E., Bashmakov I.A. Substantiation of mathematical models of variable heat supply during grain drying. *The agrarian scientific journal*. 2021; 11: 87–92. (In Russ.).

7. Pat. No. 2539860 RF Method for oscillating grain drying and device for its implementation / Pavlov S.A., Golubkovich A.V., Lukin I.D., Mashkovtsev M.F. // *Bull.* 2015. No. 3.

8. Marin R.A. Investigation of moisture transfer in grain during oscillating drying. *Agricultural machines and technologies*. 2016; 3: 26–32. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 22.02.2023; одобрена после рецензирования 12.03.2023; принята к публикации 25.03.2023.

The article was submitted 22.02.2023; approved after reviewing 12.03.2023; accepted for publication 25.03.2023.

